

В.М. СМІРНОВ, канд. техн. наук

(Україна, Донецький національний технічний університет),

В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, д-р техн. наук

(Україна, Харків, НТУ "Харківський політехнічний інститут"),

М.І. СОКУР, д-р техн. наук

(Україна, Кременчук, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського),

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ПРОДУКТИВНОСТІ БАРАБАННИХ МЛИНІВ

Постановка проблеми і стан її вивчення. Розробка теоретичних основ дроблення і подрібнення корисних копалин розглядається науковцями в галузі збагачення корисних копалин як актуальна задача, з огляду на високу енергоємність процесу, його багатофакторність і великий ресурс способів і технічних засобів дроблення і подрібнення. Крім того, актуальність теоретичного аналізу процесів дезінтеграції мінеральної сировини перед основними процесами збагачення обумовлюється їх тісним взаємозв'язком, що вимагає комплексного підходу. Розробці наукових основ дроблення і подрібнення руд присвячено ряд праць вітчизняних [1-9] і закордонних [10-15] вчених.

Мета статті – одержання аналітичних виразів для визначення продуктивності барабанного млина, введення у науковий обіг методики розрахунку продуктивності барабанного млина за питомим навантаженням і за ефективністю подрібнення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі дослідницькі задачі:

- проаналізувати фактори, що впливають на продуктивність барабанних млинів;
- викласти методики розрахунку продуктивності барабанного млина за питомим навантаженням і за ефективністю подрібнення.

Виклад основного матеріалу

Аналіз факторів, що впливають на продуктивність барабанних млинів. Продуктивність барабанних млинів вимірюється:

- кількістю тонн подрібненого вихідного матеріалу (т/год., т/добу);
- кількістю новоутворених поверхонь-тонн за одиницю часу;
- кількістю тонн новоутвореного розрахункового класу крупності (звичайно – 0,074 мм) за одиницю часу.

Продуктивність млинів визначається багатьма факторами, які можна розділити на три групи:

- *технологічні фактори*, які залежать від властивостей матеріалу – крупності вихідного матеріалу і подрібненого продукту, подрібнюваності руди;
- *конструктивні фактори*, які залежать від конструкції млина, його розміру, форми футеровки;
- *експлуатаційні фактори*, які визначаються умовами роботи млина – відкритий або замкнений цикл, ефективність роботи класифікаційного апарата, заповнення млина подрібнювальним середовищем, характеристика крупності, форма, густина і твердість подрібнювальних тіл, розрідженість пульпи, число обертів млина.

Регулюванню при експлуатації піддаються тільки фактори третьої групи, а також крупність вихідної руди і продукту подрібнення.

Між продуктивністю млина і подрібнюваністю матеріалу, його крупністю і крупністю подрібненого продукту існує прямо пропорційна залежність. Практикою встановлено, що оптимальна крупність живлення стержневих млинів – 15 – 20 мм, а кульових – 10 – 15 мм (така крупність може бути отримана після тристадіального дроблення). Для млинів самоподрібнення крупність живлення – 300 – 500 мм (така крупність може бути отримана після одностадіального дроблення). Чим менше крупність вихідного матеріалу і чим крупніше подрібнений продукт, тим вище продуктивність млина. Теоретичним підтвердженням цієї залежності є закон Ріттинґера [2]:

$$6Q\delta^{-1}(d^{-1} - D^{-1}) = k_n N, \quad (1)$$

де Q – продуктивність млина; δ – густина вихідного матеріалу; D і d – середній розмір вихідного і подрібнюваного матеріалу; k_n – коефіцієнт пропорційності, який залежить від подрібнюваності матеріалу; N – корисна потужність, що споживається млином.

Якщо позначити через $\mathcal{E} = k_n / [6\delta^{-1}(d^{-1} - D^{-1})]$, формула (1) може бути представлена так:

$$Q = \mathcal{E}N. \quad (2)$$

Коефіцієнт пропорційності \mathcal{E} чисельно дорівнює кількості тонн матеріалу, який подрібнюється за 1 годину і приходиться на одиницю споживаної потужності, тобто він являє собою ефективність подрібнення. Таким чином, при постійних умовах подрібнення матеріалу продуктивність млина пропорційна споживаній корисній потужності. За практичними даними корисна потужність складає 75 – 90 % від загальної споживаної потужності[4].

Між корисною потужністю і геометричними розмірами барабанного млина існує визначена залежність, яка представлена формулою[4]:

$$N = kD^{2.5 \div 2.6}L, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт пропорційності; D і L – діаметр і довжина барабана млина.

Формула (3) правильна при визначеному і постійному режимах роботи млина. При збільшенні довжини кульового млина з решіткою і при роботі його у замкненому циклі з класифікатором необхідно знижувати його питому продуктивність. Оптимальне циркуляційне навантаження цих млинів при визначеному режимі роботи обернено пропорційне довжині їхнього барабана.

Якщо підставити значення N з формули (3) у формулу (2) і позначити $\mathcal{E}k = c$, то отримуємо:

$$Q = \mathcal{E}k D^{2,5 \div 2,6} L = c D^{2,5 \div 2,6} L. \quad (4)$$

Таким чином, при інших рівних умовах продуктивність млина пропорційна діаметру його барабана в степені $2,5 \div 2,6$ і його довжині. Показник степені D для кульових млинів складає $2,5$, а для млинів самоподрібнення $2,6$.

Питома продуктивність, тобто продуктивність, що припадає на одиницю внутрішнього об'єму (при $a = 4c/\pi$) становить:

$$q = c D^{2,5 \div 2,6} L / (\pi D^2 L / 4) = 4c D^{0,5 \div 0,6} / \pi = a D^{0,5 \div 0,6}, \quad (5)$$

тобто питома продуктивність млина пропорційна діаметру його барабана в ступені $0,5 \div 0,6$.

З викладеного витікає, що відношення питомих продуктивностей двох млинів, які подрібнюють один й той же матеріал при однаковому режимі роботи, дорівнює відношенню їхніх діаметрів в степені $0,5 \div 0,6$:

$$q_2 / q_1 = (D_2 / D_1)^{0,5 \div 0,6}. \quad (6)$$

Продуктивність млина пропорційна витратам енергії на подрібнення, а витрати енергії пов'язані зі ступенем заповнення млина подрібнювальним середовищем. З ростом ступеня заповнення φ млина подрібнювальним середовищем зростає витрата енергії на подрібнення і досягає максимуму при ступені заповнення $\varphi = 50\%$. Відповідно зростає й продуктивність млина.

З підвищенням відносної частоти обертання спостерігається підвищення споживаної питомої потужності. Одночасно продуктивність і вихід класу – $0,074$ мм в розрахунку на 1 кВт·год зростають приблизно так само, як і частота. Однак це справедливо до деякої межі (для млинів типу «Аерофол» до $\psi = 0,95$; для млинів типу «Каскад» до $\psi = 0,85$).

Якщо у живленні млина самоподрібнення міститься багато дріб'язку, його продуктивність знижується, тому що немає достатньої кількості крупних гру-

док, які могли би подрібнити грудки середньої величини, руда подрібнюється дуже повільно і, головним чином, стиранням.

Оптимальні ступені заповнення млина подрібнювальним середовищем φ і відносні частоти обертання барабана ψ , при яких досягаються найбільш високі показники подрібнення, наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Оптимальні значення ступеня заповнення млина
подрібнювальним середовищем φ і відносної частоти
обертання барабана ψ [4]

Значення, %	Млини				
	Кульові	Стержневі	«Каскад»	«Аерофол»	Рудногалькові
φ	40 – 50	35 – 40	38 – 42	35 – 42	45 – 50
ψ	75 – 80	65 – 70	70 – 75	85 – 95	75 – 85

Розрідження пульпи у млині визначає масу або об'єм твердого матеріалу, який знаходиться у ньому у кожний даний момент, а також ефективність дії подрібнювальних тіл. Загальний об'єм пульпи у млині приблизно постійний, тому зі збільшенням вмісту у пульпі води вміст твердого зменшується, і навпаки. При меншому вмісті води густина пульпи збільшується і, отже, подрібнювальні тіла при русі у більш густому середовищі будуть мати меншу силу удару.

Вміст води у пульпі визначає її текучість і здатність проходження через млин. При вмісті води близько 20 % матеріал достатньо вільно проходить через млин[16]. Чим більше густина пульпи, тим більше крупних частинок досягає розвантажувального кінця млина. У млинах з центральним розвантаженням цей крупний матеріал іде у розвантаження і вміст крупного класу у продукті подрібнення збільшується. У млинах з решіткою густа пульпа, яка містить крупні частинки затримується решіткою і збільшення вмісту крупного класу у розвантаженні млина не спостерігається. При великих розрідженнях пульпи матеріал швидше проходить млин з решіткою, що приводить до укрупнення продукту подрібнення. У млинах з центральним розвантаженням великі розрідження, навпаки, спричиняють збільшення вмісту дрібних класів у подрібненому продукті.

Продуктивність млина тим вище, чим вище ефективність класифікації. Низька ефективність класифікації особливо негативно впливає на роботу млина при малих циркуляційних навантаженнях. Підвищення ефективності класифікації визначає зменшення кількості переподрібненого матеріалу. Збільшення швидкості проходження матеріалу через млин, що спостерігається при зростанні циркуляційного навантаження, сприяє підвищенню ефективності роботи подрібнювального середовища, зменшенню ступеня переподрібнення і підвищенню продуктивності млина.

Вплив конструкції млинів і форми футеровки на їхню продуктивність встановлений на основі практичних даних. Млини, які працюють з низьким рі-

внем пульпи, мають продуктивність дещо більшу, ніж млини з високим рівнем пульпи. Так, продуктивність млинів з решіткою приблизно на 15 % вище продуктивності млинів з центральним розвантаженням. Цей факт пояснюється тим, що при низькому рівні пульпи елементи подрібнювального середовища діють більш ефективно. Продуктивність млинів з гладкою футеровкою менше, ніж млинів з ребристою футеровкою.

Всі зазначені особливості суттєво впливають на розрахунок продуктивності млина і повинні знаходити своє відображення в аналітичних та емпірико-аналітичних розрахункових формулах.

Розрахунок продуктивності барабанних млинів. Продуктивність барабанних млинів в сучасній практиці розраховують за методом подібності, виходячи з практичних даних роботи млинів на подібній сировині при режимах, близьких до оптимального. Розрахунок роблять за *питомою продуктивністю* або за *ефективністю подрібнення*. При розрахунку враховують відмінності в подрібнюваності, крупності вихідного і подрібненого продуктів, розмірах млинів і способі їхнього розвантаження.

Розрахунок продуктивності млина за питомих навантаженням. За цим методом необхідно спершу експериментально визначити питому продуктивність еталонного млин¹ за новоутвореним розрахунковим класом (як правило, клас крупності – 0,074 мм).

Питома продуктивність проектного млина за новоутвореним розрахунковим класом визначається за формулою[16]:

$$q = q_e k_n k_k k_T k_\varphi k_\psi k_L k_D, \quad (7)$$

де q – питома продуктивність проектного млина за новоутвореним розрахунковим класом, т/год·м³; q_e – питома продуктивність еталонного млина за новоутвореним розрахунковим класом, т/год·м³; k_n – коефіцієнт, що враховує відмінності в подрібнюваності проектного до переробки руди і руди, що переробляється; k_k – коефіцієнт, що враховує розбіжності в крупності вихідного і кінцевого продуктів на діючій та проектній фабриках; k_T – коефіцієнт, що враховує розбіжності в типі проектного і працюючого млинів; k_φ – коефіцієнт, що враховує розходження в об'ємному заповненні проектного і працюючого млинів подрібнювальним середовищем; k_ψ – коефіцієнт, що враховує розходження в частоті обертання проектного і працюючого млинів; k_L – коефіцієнт, що враховує розходження в довжині барабанів проектного і працюючого млинів; k_D – коефіцієнт, що враховує розбіжності в діаметрах барабанів проектного і працюючого млинів.

¹ який працює на діючій фабриці

Коефіцієнт подрібнюваності руди k_n визначають експериментально у процесі досліджень проекрованої руди на подрібнюваність. Звичайно $k_n > 1$, якщо проектована для переробки руда має меншу міцність від еталонної, і $k_n < 1$, якщо проектована для переробки руда має більшу міцність від еталонної. Якщо міцність проекрованої для переробки руди і еталонної однакова, то коефіцієнт подрібнюваності $k_n = 1$ [4].

Коефіцієнт крупності руди k_k визначається співвідношенням відносної продуктивності проектованого і еталонного млинів:

$$k_k = m / m_e, \quad (8)$$

де m – відносна продуктивність проектованого млина за новоутвореним розрахунковим класом при заданій крупності вихідного і кінцевого продуктів; m_e – те ж для еталонного млина.

Відносну продуктивність млини приймають відповідно до даних табл. 2.

Таблиця 2

Відносна продуктивність млинів за новоутвореним класом – 0,074 мм залежно від крупності вихідного і кінцевого продуктів [4]

Крупність вихідного матеріалу, мм	Вміст класу –0,074 мм в кінцевому продукті, %						
	30	40	48	60	72	85	95
0– 40	0,68	0,77	0,81	0,83	0,81	0,80	0,78
0– 20	0,81	0,89	0,92	0,92	0,88	0,86	0,82
0– 15	0,87	0,95	0,98	0,96	0,91	0,88	0,83
0– 10	0,96	1,02	1,03	1,00	0,93	0,90	0,84
0– 5	1,11	1,15	1,13	1,05	0,95	0,91	0,85
0– 3	1,17	1,19	1,16	1,06	0,95	0,91	0,85

Коефіцієнт типу млина k_T (табл. 3) враховується, якщо тип розвантаження проектованого млина відрізняється від еталонного.

Таблиця 3

Значення коефіцієнта k_T [4]

Співвідношення типів млинів	Проектований	МШЦ	МШЦ	МШР	МШР
	Еталонний	МШР	МШЦ	МШР	МШЦ
Значення k_T		1,1	1,0	1,0	0,9

Коефіцієнт частоти обертання барабана k_ψ вводять при розбіжності між частотами обертання проектованого ψ і еталонного ψ_e млинів (табл. 4):

$$k_\psi = \psi / \psi_e, \quad (9)$$

Таблиця 4

Граничні частоти обертання млинів [4]

Тип	МСЦ	МШЦ і МШР	МШЦ і МШР	МШЦ і МШР
-----	-----	-----------	-----------	-----------

Підготовчі процеси збагачення

млина		об'ємом до 50 м ³	об'ємом 50-100 м ³	об'ємом більше 100 м ³
$\psi, \%$	60–72	75–85	75–82	70–78

Коефіцієнт заповнення подрібнювальним середовищем k_ϕ запроваджується при розбіжності в ступені заповнення проектного ϕ й еталонного ϕ_e млинів подрібнювальними тілами (максимальний ступінь заповнення – табл. 5):

$$k_\phi = \phi / \phi_e, \quad (10)$$

Таблиця 5

Максимальний ступінь заповнення млинів подрібнювальним середовищем [4]			
Тип млина	МСЦ	МШЦ	МШР
$\phi, \%$	35	42	45

Середня насипна густина середовища при розрахунках приймається для куль 4,6 т/м³, для стержнів 6,6 т/м³.

Коефіцієнт довжини млина k_L визначають за формулою:

$$k_L = (L / L_e)^{0,15}, \quad (11)$$

де L і L_e – довжина проектного і еталонного млинів, м.

Коефіцієнт діаметра млина k_D визначають за формулою:

$$k_D = \sqrt{(D - 2t) / (D_e - 2t_e)}, \quad (12)$$

де D і D_e – діаметри проектного і еталонного млинів, м; t і t_e – товщина футеровки проектного і еталонного млинів:

$$t = 0,04 + 0,02D, \text{ м.} \quad (13)$$

Продуктивність млина по вихідній руді:

$$Q = Vq / (\beta_k - \beta_e), \text{ т/год,} \quad (14)$$

де V – номінальний об'єм барабана проектного млина, м³; q – питома продуктивність проектного млина за новоутвореним розрахунковим класом, т/год·м³; β_e і β_k – вміст розрахункового класу крупності відповідно у вихідному живленні і готовому кінцевому продукті, частки од.

Визначивши продуктивність млинів декількох типорозмірів, необхідно зробити їхнє порівняння і вибрати варіант найменш метало- і енергоємний. Практично у всіх випадках доцільний перехід від використання млинів меншого об'єму до більшого.

Викладену методику розрахунку за питомим навантаженням рекомендується використовувати для визначення продуктивності барабанних млинів зі сталевими подрібнювальними тілами.

Розрахунок продуктивності млина за ефективністю подрібнення

Ця методика використовується при розрахунку продуктивності млинів самоподрібнення.

Ефективність подрібнення для проектного млина розраховують за формулою [16]:

$$e = e_e k_n k_k, \quad (15)$$

де e – ефективність подрібнення проектного млина за новоутвореним розрахунковим класом, т/кВт·год; e_e – ефективність подрібнення еталонного млина за новоутвореним розрахунковим класом, т/кВт·год; k_n і k_k – коефіцієнти подрібнюваності і крупності, обумовлені так само, як і при розрахунку млина за питомою продуктивністю.

Коефіцієнти, що враховують розміри і тип млина, у формулу не включені, тому що ці фактори мало впливають на ефективність подрібнення.

Продуктивність млина по вихідній руді визначається за формулою:

$$Q = N \eta e / (\beta_k - \beta_s), \text{ т/год}, \quad (16)$$

де N – установлена потужність електродвигуна млина, кВт; η – коефіцієнт використання потужності електродвигуна ($\eta = 0,85\text{--}0,90$); інші позначення ті ж самі.

Вибір варіанта установлення млинів здійснюється так само, як і при використанні попередньої методики.

Висновки

1. Проаналізовані фактори, що впливають на продуктивність барабанних млинів, запропонована їх класифікація і виділені найбільш значимі чинники, які надалі використані в методиках розрахунку продуктивності барабанного млина.
2. Викладені методики розрахунку продуктивності барабанного млина за питомим навантаженням і за ефективністю подрібнення.

Список літератури

1. N. Sokur, V. Biletskyy, L. Sokur, D. Bozyk, I. Sokur. Investigation of the process of crushing solid materials in the centrifugal disintegrators // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – 3/7(81). – P. 34-40.
 2. Сокур М.І. Дезінтеграція мінеральних ресурсів: монографія / М.І. Сокур, М.В. Кіяновський, О.М.Воробйов та ін. – Кременчук: Вид-во ПП Щербатих О. В., 2014 – 304 с.
 3. Горобець Л.Ж. Розвиток наукових основ подрібнення твердих корисних копалин: дис ... д-ра техн. наук: 05.15.08 / Національний гірничий ун-т. – Д., 2004.
 4. Сокур М.І., Білецький В.С. та ін. Підготовка корисних копалин до збагачення: монографія / Сокур М.І., Білецький В.С., Єгурнов О.І., Воробйов О.М., Смирнов В.О., Божик
- Збагачення корисних копалин, 2019. – Вип. 73(114)**

Д.П.– Кременчук: Кременчуцький національний ун-т ім. М.Остроградського, Академія гірничих наук України. ПП Щербатих О.В., 2017.– 392 с.

5. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1985. – 282 с.

6. Сокур Н.И. Соколовский А.К. Закономерности движения материала в разгрузочной части барабанной мельницы с принудительной разгрузкой // Горный журн. – 1981. – №6. – С. 51-53.

7. Сокур Н.И. К вопросу разрушения минерального сырья в поле центробежных сил // Новые технологии дня переработки руд: Отрасл. темат. сб. /Минпрем Украины. Кривой Рог, 1993.

8. Jankovic, A. Relationships between comminution energy and product size for a magnetite ore [Електронний ресурс] / A. Jankovic, H. Dundar, R. Mehta // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – March 2010. – Vol. 110. – Pp. 141–146. – Режим доступу : URL: <http://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v110n3/07.pdf>.

9. Сокур М.І. Білецький В.С. Божик Д.П. Наукові основи збільшення продуктивності млинів// Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. 67(108). – С. 64-68.

10. Refahi, A. Comparison between bond crushing energy and fracture energy of rocks in a jaw crusher using numerical simulation [Електронний ресурс] / A. Refahi, J. Aghazadeh Mohandesi, B. Rezai // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – Dec. 2009. – Vol. 109. – Pp. 709-717. – Режим доступу : URL <http://www.scielo.org.za/pdf/jsaimm/v109n12/03.pdf>.

11. Whittles, D. Laboratory and numerical investigation into the characteristics of rock fragmentation [Text] / D. Whittles, S. Kingman, I. Lowndes, K. Jackson // Minerals Engineering. – 2006. – Vol. 19. – Pp. 1418-1429.

12. Sibson, R.H. (1986). "Earthquakes and rock deformation in crustal fault zones" . Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 14: 156. Retrieved 2 July 2011.

13. Thomas, A; Filippov, L.O. (1999). "Fractures, fractals and breakage energy of mineral particles". International Journal of Mineral Processing. 57 (4): 285. doi:10.1016/S0301-7516(99)00029-0

14. Strohmayer, S. and Valery, W. Jr. SAG mill circuit optimisation at Ernest Henry Mining. 2001. URL: [http://www.metso.com/miningandconstruction/mct_service.nsf/WebWID/WTB120106-22576-29D77/\\$File/057.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/mct_service.nsf/WebWID/WTB120106-22576-29D77/$File/057.pdf)

15. Яшин В.П., Бортников В.П. Теория и практика самоизмельчения руд. – М.: Недра, 1978. – 227 с.

16. Смирнов В.О., Білецький В.С. Підготовчі процеси збагачення корисних копалин. – Донецьк: Східний видавничий дім, Донецьке відділення НТШ, 2012. – 284 с.

© Смирнов В.М., Білецький В.С., Сокур М.І., 2019

Надійшла до редколегії 12.08.2019 р.

Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горобець